

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ ТОКОСЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВА. А. Гришин¹, Н. А. Смирнов², А. И. Харитонов¹¹ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»
Российская Федерация, 662972, г. Железногорск, ул. Ленина, 52²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: grishin_aa@list.ru

Представлен анализ типовой конструкции современных кольцевых токосъемных устройств, применяемых в космической технике. Главной целью работы явилось определение конструктивных методов и приемов, улучшающих выходные характеристики кольцевого токосъемного устройства и позволяющих сохранить надежность функционирования устройства на протяжении всего срока активного существования космического аппарата на орбите.

Рассмотрена роль кольцевого токосъемного устройства в системе электропитания космического корабля, описаны его основные конструктивные элементы, кратко изложены принципы функционирования. Определены выходные характеристики кольцевого токосъемного устройства – величина падения напряжения на слое токосъемных колец и суммарная мощность, рассеиваемая на устройстве. Установлены факторы, влияющие на описанные выходные параметры, – изменение фактической площади контакта между токосъемными кольцами одной кинематической контактной пары, попадание частиц диэлектрического материала на контактную поверхность токосъемных колец, образование непроводящих пленок. Показано влияние осевой и радиальной неустойчивости обойм токосъемных колец на фактическую площадь контакта токосъемных колец кинематической контактной пары. Описаны причины образования частиц диэлектрического материала в процессе функционирования устройства, образования пленки диэлектрического материала на контактной поверхности токосъемных колец. Рассмотрено влияние суммарной радиальной смещающей силы на деформацию контактных колец кинематической контактной пары. Установлена связь между циклическим нагружением наружных токосъемных колец и волнообразным изменением момента проворота выходного вала устройства. Представлен и описан эксперимент по влиянию колебаний момента проворота выходного вала устройства на величину падения напряжения на токосъемных кольцах одного слоя.

В заключение сделан вывод о необходимости сглаживания пиков момента проворота для получения более ровной и стабильной характеристики изменения падения напряжения на слое токосъемных колец, снижения средней величины падения напряжения на каждом слое токосъемных колец и, следовательно, уменьшения суммарной мощности, рассеиваемой на кольцевом токосъемном устройстве. Предложено включить в будущие конструкции кольцевых токосъемных устройств решения, позволяющие добиться как осевой, так и радиальной стабильности обойм токосъемных колец в процессе функционирования устройства.

Ключевые слова: кольцевое токосъемное устройство, фактическая площадь контакта, переходное сопротивление, падение напряжения на токосъемных кольцах, суммарная рассеиваемая мощность.

Vestnik SibGAU
2014, No. 5(57), P. 146–152**THE ANALYSIS OF THE DESIGN OF THE CURRENT COLLECTION DEVICES**A. A. Grishin¹, N. A. Smirnov², A. I. Kharitonov¹¹JSC “Information satellite systems” named after academician M. F. Reshetnev”
52, Lenin Str., Zheleznogorsk, Krasnoyarsk region, 662972, Russian Federation²Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: grishin_aa@list.ru

The analysis of a design modern current collection devices used in space equipment is presented in the article. The main objective of this work is determination of the constructive methods and receptions that improve the output characteristics of the current collection device, preserving the reliability of functioning of the device throughout all term of active existence of the spacecraft in an orbit.

The role of the current collection device in a spaceship power supply system is considered; the basic constructive elements of the device are described; the principles of functioning of the device are stated. The main output characteristics of the current collection device – value of the voltage drop across the layer of the collector rings and the total power disseminated on the device are defined. The factors affecting described output parameters – change the actual contact area between the collector rings one kinematic contact pairs, the penetration of particles of dielectric material on the contact surface of the collector rings, the formation of non-conductive films. It shows the influence of axial and radial instability clips collector rings on the actual contact area of collector rings one kinematic contact pair, are stated. The reasons for the formation of particles of the dielectric material during operation of the device, formation of a film of dielectric material on the contact surface of the collector rings are described. The influence of the total radial bias force on the deformation of the contact rings one kinematic contact pair is considered. The relation between the cyclic loading of the outer collector rings and wave-like change of the moment of rotation of the output shaft of the device is determined. An experiment on the effects of fluctuations in the torque of rotation of the output shaft of the device on the value of the voltage drop at the collector rings in a single layer is presented and described.

The authors conclude that smoothing the peaks of the twisting moment will provide smoother and stable characteristic changes of the voltage drop across the collector layer of the rings, to reduce the average value of the voltage drop on each layer of the collector rings and, therefore, reduce the total power dissipated on the current collection device. It is suggested to include solutions to achieve axial and radial stability clips of current collector rings in the operation of the device in the future construction of current collection devices.

Keywords: the current collection device, the actual area of contact, contact resistance, the voltage drop across the collector rings, the total disseminated power.

Введение. Одним из основных требований, предъявляемых к космическим аппаратам (КА), является обеспечение надежного функционирования в течение всего срока активного существования на орбите. Полезная нагрузка и модуль служебных систем современных искусственных спутников Земли потребляют до 15 кВт электрической мощности. Система электропитания КА предназначена для обеспечения бесперебойного автономного электроснабжения на всех этапах его существования, кроме этапа наземных испытаний, на котором используются внешние источники электропитания [1–5]; она должна обеспечивать автономное непрерывное энергопитание КА в условиях значительной неравномерности электрической нагрузки в течение витка и суток [5].

Центральное место в системе электропитания КА и системе ориентации солнечных батарей занимают устройства поворота (УП) солнечных батарей.

В проектных разработках УП солнечных батарей российских и зарубежных фирм наметилась тенденция обеспечения неограниченного угла поворота солнечных батарей с передачей электроэнергии, команд-

ной и телеметрической информации через блок токосъемных устройств [6]. В УП для транзита электрической энергии от вращающихся солнечных батарей к внутренним системам КА успешно применяются кольцевые токосъемные устройства (КТУ). Вся электрическая энергия, необходимая для функционирования КА, выработанная в солнечных батареях изделия, поступает на борт через КТУ.

В результате нестабильной работы КТУ в течение срока активного существования КА возможно увеличение падения напряжения и рассеиваемой тепловой мощности на устройстве. Для стабильной передачи электрической энергии через КТУ необходимо повышать надежность работы КТУ, его коэффициент полезного действия, от которых напрямую зависит функционирование всей энергосистемы космического аппарата и «живучесть» КА в целом.

В такой ситуации ресурс КТУ должен превышать срок активного существования КА на орбите, а само КТУ – сохранять заложенные выходные параметры в течение всего срока функционирования аппарата. Модель КТУ представлена на рис. 1 [7].



Рис. 1. Модель кольцевого токосъемного устройства

Слой токосъемных колец кольцевого токосъемного устройства состоит из следующих основных элементов:

- неподвижного внешнего токосъемного кольца (ТК);
- вращающегося внутреннего ТК;
- гибких контактных колец для передачи электрической энергии;
- диэлектрических изоляторов слоев ТК;
- диэлектрических изоляторов гибких контактных колец.

В процессе вращения солнечной батареи на неограниченный угол, передача электроэнергии от внутренних ТК к наружным осуществляется через упругие, катающиеся подобно шарикоподшипникам гибкие контактные кольца. Все контактные кольца разделены диэлектрическими изоляторами.

При изготовлении КТУ контролируются следующие основные параметры (целевые функции):

- падение напряжения на каждом слое токосъемных колец КТУ;
- суммарная тепловая мощность, рассеиваемая на КТУ.

В процессе функционирования КТУ, а именно при вращении его выходного вала, происходит колебание положения внешних ТК относительно внутренних как в осевом, так и радиальном направлениях.

Основной задачей, стоящей при изготовлении КТУ, является минимизация величин указанных целевых функций. Рассмотрение кинематики работы КТУ показало влияние на целевые функции двух факторов:

- колебание фактической площади контакта (ФПК) между ТК одной кинематической контактной пары в процессе вращения вала КТУ;
- образование непроводящих пленок на контактной поверхности ТК в процессе функционирования КТУ.

Из-за волнистости и шероховатости, полученных в результате механической обработки контактирующих поверхностей, смещения контактирующих поверхностей относительно друг друга и присутствия непроводящих пленок, реальная площадь контакта в сотни раз меньше, чем номинальная. Кроме того, под действием нагрузки различные участки площади контакта деформируются по-разному: выступы шероховатости или волны – упруго, а микровыступы – пластически [8–9].

В результате нарушения ФПК между ТК, а также образования на их контактных поверхностях непроводящих пленок, резко возрастает величина переходного сопротивления в месте контакта колец кинематической контактной пары. С возрастанием переходного сопротивления увеличивается величина падения напряжения на слое ТК и, как следствие, суммарная мощность, рассеиваемая на КТУ.

Детальное рассмотрение кинематики функционирования КТУ [10] выявило два фактора, влияющих на величину падения напряжения на слое ТК: осевое смещение внутренних и наружных ТК относительно друг друга и радиальное.

Осевое смещение внутренней и наружной обойм ТК относительно друг друга. Конструкция КТУ не предусматривает дополнительных элементов, предо-

храняющих внутреннюю обойму токосъемных колец от осевого смещения относительно наружной. Из-за различий в конструкции изоляторов внутренних и наружных токосъемных колец, различной площади их поверхности при сборке КТУ в изоляторах внутренних и наружных ТК могут формироваться различные внутренние напряжения. По окончании сборки КТУ и снятию КТУ с технологической оснастки накопленное внутреннее напряжение высвобождается и происходит смещение обойм ТК относительно друг друга. Экспериментально установлена максимальная величина осевого смещения, равная 0,1 мм.

Осевому смещению обойм ТК препятствуют контактные кольца слоев ТК: при смещении внутренней обоймы относительно наружной контактные кольца, являясь единственным связующим элементом внутренней и наружной обойм ТК, перемещаются и соприкасаются торцевой кромкой с поверхностью изоляторов соседних слоев ТК (рис. 2). В этом случае контактные кольца начинают играть роль ограничителя осевого смещения обойм токосъемных колец.

При смещении контактных колец относительно первоначального положения, выставленного при сборке КТУ, изменяется ФПК между кольцами одной контактной кинематической пары.

В результате взаимодействия торцевых кромок контактных колец с боковыми поверхностями изоляторов внутренних и наружных ТК может происходить выкрашивание материала изолятора, нарушение целостности гальванического покрытия контактных колец и попадание материала изоляторов на контактную поверхность ТК. Материал изоляторов раскатывается в процессе функционирования устройства по контактной поверхности ТК в тонкую пленку и, обладая диэлектрическими свойствами, препятствует прохождению электрического тока от внутренних ТК к наружным.

Электрический ток проходит между внутренним и наружным ТК только в отдельных точках, а не по всей площади контакта колец кинематической контактной пары [11]. В этом случае линии тока стягиваются к пятнам контакта, и вследствие этого возникает «сопротивление стягивания». Учитывая влияние непроводящих пленок, можно говорить об общем сопротивлении контакта [8].

С появлением непроводящих пленок в месте контакта ТК и изменением ФПК возрастает падение напряжения на слое токосъемных колец и увеличивается суммарная мощность, рассеиваемая на КТУ.

В настоящее время для решения проблемы механического взаимодействия контактных колец и изоляторов ТК прилагаются усилия по максимальному улучшению шероховатости поверхности контактирующих тел. Торцевая поверхность контактных колец выполняется в виде радиусов с шероховатостью поверхности не более 0,16 Ra; коническая часть изоляторов внутренних и наружных ТК полируется после окончательной механической обработки.

Для предотвращения осевого смещения ТК в конструкции КТУ применяются механические упоры, ограничивающие смещение внутренней обоймы ТК относительно наружной в пределах 0,1 мм.

Радиальное смещение наружного ТК относительно внутреннего в каждом слое. В каждом слое ТК между внутренним и наружным ТК устанавливается расчетное количество контактных колец. При установке контактных колец в зазор между внутренним и наружным ТК они приобретают форму эллипса. Расстояние между малыми полуосями эллипса зависит от фактического зазора между внутренним и наружным ТК и является непостоянным. Причина такого непостоянства кроется в суммарной смещающей силе, складывающейся из упругих сил «разжатия» всех деформированных контактных колец слоя и смещающей наружное ТК относительно внутреннего.

Сразу после сборки КТУ такая сила незначительна по причине относительно равномерного расположения контактных колец в каждом из слоев ТК. Экспериментально установлено [10], что в процессе вращения внутреннего вала КТУ происходит перераспределение контактных колец каждого слоя в один из секторов, в результате чего вектор смещающей силы может измениться, а абсолютная величина – возрасти. Под действием суммарной смещающей силы наружное ТК смещается относительно внутреннего: с одной стороны зазор между кольцами сокращается, с другой – увеличивается. С изменением зазора между внутренним и наружным ТК изменяется степень сжатия контактных колец, расстояние между малыми полуосями эллипса и, как следствие, ФПК между кольцами одной кинематической контактной пары. Максимальную деформацию испытывает контактное кольцо, занимающее центральное место – напротив действия суммарной радиальной смещающей силы.

Смещение наружного ТК относительно внутреннего в радиальном направлении ограничивается изоляторами контактных колец. В результате действия суммарной радиальной смещающей силы возникает цикличность нагружения наружного ТК за один оборот внутреннего ТК КТУ (рис. 3). Период цикла напряжений (σ_H) в точке наружного токосъемного кольца напротив действия радиальной силы равен времени

перемещения очередного изолятора контактных колец в данную точку (τ) [12–13].

При вращении внутреннего ТК и неподвижном наружном ТК, за один оборот внутреннего ТК группа контактных колец и их изоляторов повернется на

$$(1 - f_g) / 2 = 0,43 \text{ оборота,}$$

где f_g – геометрический параметр, равный 0,1367.

Таким образом, за один оборот внутреннего ТК произойдет

$$((1 + f_g) \cdot Z) / 2 = 6,24$$

циклов нагружения точки наружного ТК напротив линии действия радиальной силы, где Z – число тел качения [14].

О радиальном смещении наружного ТК относительно внутреннего, цикличности нагружения наружного ТК можно судить по связанному с ними изменению момента проворота вала КТУ по отнулевому циклу.

При проведении предварительных исследований трех образцов КТУ подтверждено наличие около 7 циклов возрастания момента проворота вала КТУ.

В ходе эксперимента одновременно отслеживалось изменение момента проворота вала КТУ и величина падения напряжения на слоях токосъемных колец на полном обороте вала КТУ.

На рис. 4 представлен график зависимости изменения напряжения датчика силы, установленного на валу КТУ (т. е. изменение момента проворота вала КТУ), за один оборот внутреннего ТК.

С цикличным изменением силы нагружения наружного ТК циклично изменяется ФПК между ТК каждого слоя и, следовательно, циклично изменяется величина падения напряжения на ТК. График зависимости падения напряжения на слое токосъемных колец за один оборот внутреннего ТК представлен на рис. 5.

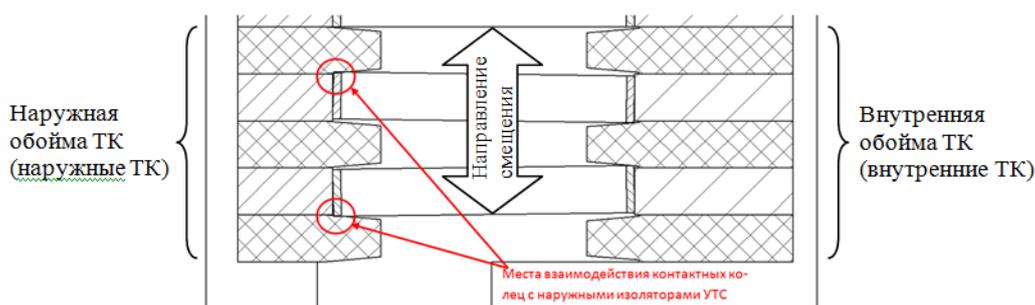


Рис. 2. Схема механического контакта токосъемных колец

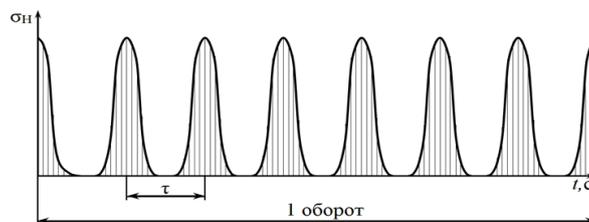


Рис. 3. График изменения нагружения точки наружного ТК за один оборот внутреннего ТК

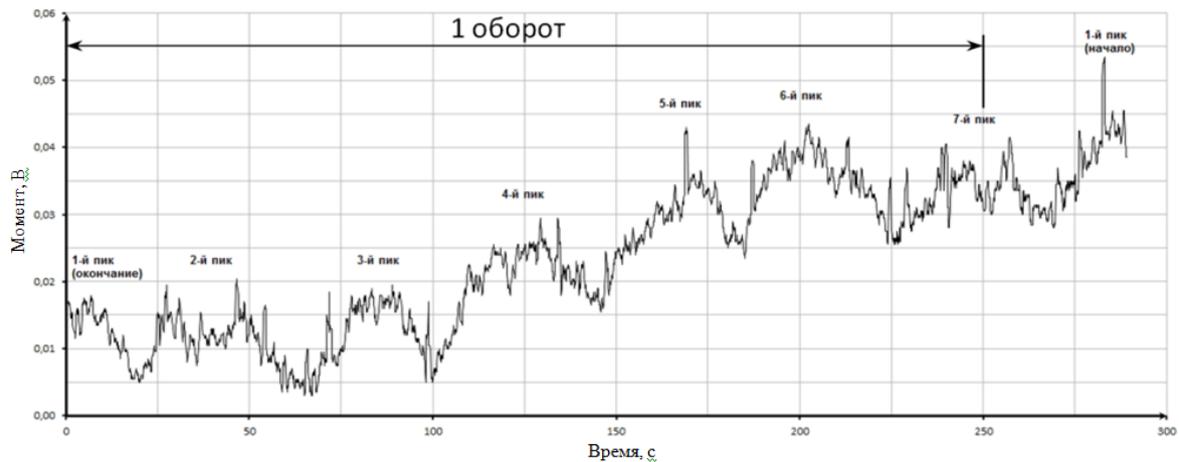


Рис. 4. График изменения момента проворота вала КТУ за один оборот внутреннего ТК

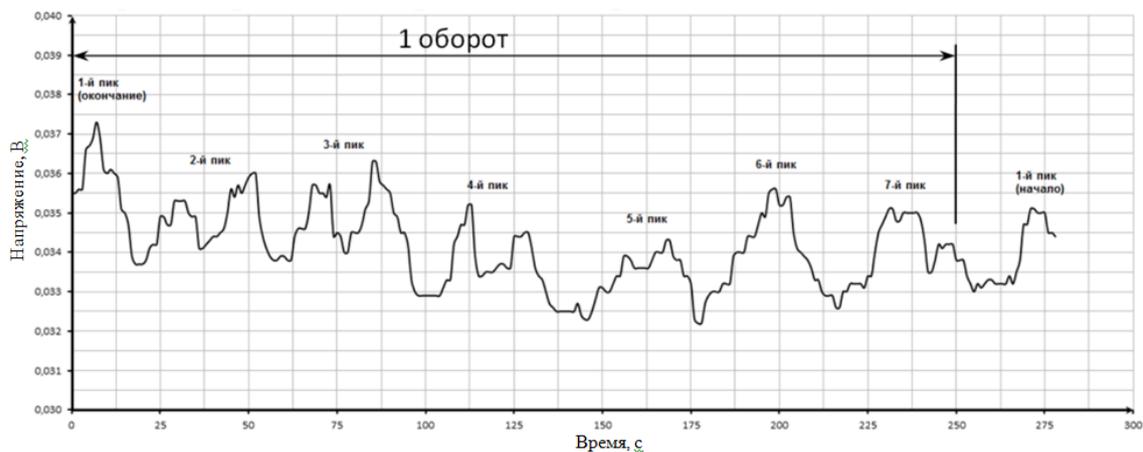


Рис. 5. График изменения величины падения напряжения на слое ТК за один оборот внутреннего ТК

Анализ характеристики изменения величины падения напряжения за один оборот вала КТУ показал наличие семи основных экстремумов (точек максимума). Некоторые волны нарастания момента проворота вала КТУ при достижении локального максимума «раздваиваются» (2-й пик, 3-й пик, 4-й пик). Вслед за изменением величины момента проворота вала КТУ меняется и величина падения напряжения на токосъемных кольцах каждого слоя; волны нарастания падения напряжения (2-й пик, 3-й пик, 4-й пик) «раздваиваются» аналогично характеристике изменения величины момента проворота вала КТУ. Возможной причиной такого изменения момента проворота вала КТУ при прохождении второго, третьего и четвертого пиков может являться проскальзывание изолятора контактных колец через зазор между внутренним и наружным ТК напротив действия суммарной радиальной смещающей силы.

Изолятор контактных колец, толкаемый соседним по направлению вращения контактным кольцом, подходит к месту минимального зазора между внутренним и наружным ТК. Первоначально зазор между внутренним и наружным ТК меньше наружного диа-

метра изолятора контактных колец. При последующем вращении вала КТУ давление на изолятор со стороны соседнего по направлению вращения контактного кольца нарастает.

Стоит отметить, что первоначально, даже при незначительной нагрузке, давление на контакте очень велико в силу малости площади контакта. Материал более мягкой неровности начинает пластически деформироваться, и в результате поверхности продолжают сближаться, приводя в контакт все больше неровностей. Этот процесс продолжается до тех пор, пока площадь контакта не станет достаточной, чтобы нести нагрузку [8].

С возрастанием контактного давления возрастает момент проворота вала КТУ. В момент, когда давление на изолятор контактных колец достаточно велико, изолятор разжимает внутреннее и наружное ТК и происходит его мгновенное проскальзывание в образовавшийся зазор. При проскальзывании изолятора снижается величина момента проворота вала КТУ (проявляется эффект подкручивания вала КТУ, отмеченный при экспериментах), изменяются зазоры между внутренним и наружным ТК и, как следствие,

происходит резкое изменение эллипсности всех контактных колец слоя.

Очевидно, что величина падения напряжения на ТК связана с волнообразным изменением момента проворота вала КТУ: с возрастанием величины момента проворота вала КТУ увеличивается величина падения напряжения на слое токосъемных колец.

Возрастание общего уровня величины момента проворота вала КТУ при движении от четвертого пика к пятому является следствием осевого смещения внутренней обоймы ТК относительно наружной (в процессе функционирования устройства) и контакта механического упора, установленного в середине внутренней обоймы ТК, с последующим изолятором наружных токосъемных колец. Данное изменение момента проворота вала КТУ на величину падения напряжения на ТК существенного влияния не оказывает.

Экспериментально установлено, что величина пиковых значений момента проворота вала КТУ снижается после продолжительного функционирования устройства, однако средний уровень падения напряжения на ТК не всегда снижается.

Причиной снижения величины момента проворота является прикатка контактных колец каждой кинематической пары. В процессе вращения внутренних ТК, из-за постоянного зажатия изоляторов контактных колец как между внутренним и наружным ТК (проскальзывания изоляторов контактных колец в момент их максимального зажатия), так и между контактными кольцами, происходит прикатка изоляторов контактных колец. При работе устройства на контактных поверхностях ТК образуется кольцевое пятно контакта, а наружный диаметр изоляторов контактных колец истирается.

Пятно контакта на поверхности ТК не свидетельствует о прикатке контактной пары, а является следствием их взаимодействия с изоляторами контактных колец.

Применение изоляторов контактных колец из мягких материалов (например, фторопласт-4) позволяет предохранить контактную поверхность ТК от повреждений в процессе функционирования устройства, однако в результате истирания материала самих изоляторов на контактной поверхности ТК образуется диэлектрическая пленка, препятствующая протеканию тока.

В большинстве случаев перенос материала полимерного изолятора контактных колец на сопряженную контактную поверхность ТК происходит уже после первых фрикционных актов. В зависимости от условий трения может образовываться сплошная пленка, но чаще – отдельные фрагменты перенесенного материала. При этом толщина слоя продуктов переноса может изменяться от единиц до десятков нанометров [15–16].

Предотвращение радиального смещения наружных токосъемных колец относительно внутренних позволит решить проблему как истирания изоляторов контактных колец, так и формирования необходимого пятна контакта на ТК одной кинематической контактной пары.

В дальнейшем для лучшего понимания причин радиального смещения наружных ТК относительно внутренних необходимо рассчитать суммарную смещающую силу, определить направление вектора ее действия. В контексте формирования пятна контакта между кольцами одной кинематической пары предстоит определить оптимальную геометрию ТК, количество контактных колец в слое ТК для передачи необходимой электрической энергии с минимальными потерями.

Заключение. Таким образом, предотвращение осевого и радиального смещения обойм ТК, сглаживание пиков момента проворота позволит получить более ровную и стабильную характеристику изменения падения напряжения на слое ТК, снизить среднюю величину падения напряжения на каждом слое ТК и, следовательно, уменьшить суммарную мощность, рассеиваемую на КТУ. В конструкцию КТУ в будущем следует внести такие решения, которые позволят добиться как осевой, так и радиальной стабильности обойм токосъемных колец в процессе функционирования КТУ. Подобные решения повысят надежность работы КТУ и коэффициент его полезного действия на протяжении всего срока активного существования космического аппарата.

Библиографические ссылки

1. Вентцель Е. С. Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М. : Наука, 1988. 208 с.
2. Графодатский О. С., Исляев Ш. Н. Взаимодействие спутников связи с окружающей средой. Томск : РАСКО, 1993. 208 с.
3. Космические аппараты / В. Н. Бобков [и др.] // М. : Воениздат, 1983. 319 с.
4. Тестоедов Н. А. Космические вехи : сб. науч. тр. / ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева». Красноярск, 2009. 704 с.
5. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения : учеб. пособие. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с.
6. Система ориентации солнечных батарей [Электронный ресурс] // Wikipedia. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Система_ориентации_солнечных_батарей (дата обращения: 21.11.2014).
7. Santoro C., Hayes R., Herman J. Brushless slipring for high power transmission // 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium – ESMATS 2009 (23–25 September, Vienna). Austria. 2009.
8. Мышкин Н. К., Концин В. В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный : Интеллект, 2008. 560 с.
9. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3 т. Т. 1. 8-е изд. М : Машиностроение, 2001. 920 с.
10. Гришин А. А., Смирнов Н. А., Харитонов А. И. Анализ причин «сбегания» контактных колец кольцевого токосъемного устройства в процессе его функционирования // Решетневские чтения : материалы XVIII Междунар. науч. конф. (11–14 нояб. 2014,

г. Красноярск) : в 3 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2014. С. 387–389.

11. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс]. URL: <http://toe-kgeu.ru/eea/542-eea> (дата обращения: 28.11.2014).

12. Иванов М. Н. Детали машин : учебник для вузов. М : Высш. шк., 2000. 383 с.

13. Детали машин : учебник для вузов / Л. А. Андриенко [и др.]. М : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. 544 с.

14. Галахов М. А., Бурмистров А. Н. Расчет подшипниковых узлов. М : Машиностроение, 1988. 272 с.

15. Свириденко А. И., Чижик С. А., Петроковец М. И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск : Наука и техника, 1990. 272 с.

16. Мышкин Н. К., Белый А. В., Холодилев О. В. Трение и износ. Гомель : Ин-т механики металлополимерных систем им. В. А. Белого, 1981. 686 с.

References

1. Ventsel' E. S. *Issledovanie operatsii. Zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research. Objectives, principles, methodology]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 208 p.

2. Grafodatskii O. S., Islyayev Sh. N. *Vzaimodeistvie sputnikov svyazi s okruzhayushchei sredoi* [Interaction communication satellites with the environment]. Tomsk, RASKO Publ., 1993, 208 p.

3. Bobkov V. N., Raushenbakh B. V., Feoktistov K. P. *Kosmicheskie apparaty* [Spacecraft]. Moscow, Voenizdat Publ., 1983, 319 p.

4. Testoedov N. A. *Kosmicheskie vekhi* [Cosmic milestones]. Krasnoyarsk, The Joint-stock Company Academician M. F. Reshetnev "Information Satellite Systems", 2009, 704 p.

5. Chebotarev V. E., Kosenko V. E. *Osnovy proektirovaniya kosmicheskikh apparatov informatsion-nogo obespecheniya* [Principles of design of spacecraft information support]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University named after Academician M. F. Reshetnev Publ., 2011, 488 p.

6. Wikipedia *Sistema orientatsii solnechnykh batarei* [The orientation system of solar panels]. (In Russ.). Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D1%E8%F1%F2%E5%EC%E0_%EE%F0%E8%E5%ED%F2%E0%F6%E8%E8_%F1%EE%EB%ED%E5%F7%ED%FB%F5_%E1%E0%F2%E0%F0%E5%E9 (accessed 21.11.2014).

7. Santoro C., Hayes R., Herman J. Brushless slipping for high power transmission. 13th European Space Mechanisms and Tribology Symposium – ESMATS 2009, Vienna, Austria 23–25 September 2009.

8. Myshkin N. K., Kontsin V. V., Braunovich M. *Elektricheskie kontakty* [Electrical contacts]. Dolgoprudnyi, Intelkt Publ., 2008, 560 p.

9. Anur'ev V. I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya* [Reference designer-mechanical engineer] Moscow, Mashinostroenie Publ., 2001, 920 p.

10. Grishin A. A., Smirnov N. A., Kharitonov A. I. [The analysis of the reasons of "consolidation" of contact rings of the current collection devices during its operation]. *Materialy XVIII Mezhdunar. nauch. konf. "Reshetnevskie chteniya"*. Krasnoyarsk, 2014, no. 1, p. 387–389. (In Russ.).

11. Toe-kgeu *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. (In Russ.). Available at: <http://toe-kgeu.ru/eea/542-eea> (accessed 28.11.2014).

12. Ivanov M. N. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 2000, 383 p.

13. Andrienko L. A., Baikov B. A., Ganulich I. K. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman, 2002, 544 p.

14. Galakhov M. A., Burmistrov A. N. *Raschet podshipnikovyykh uzlov* [Calculation of bearing assemblies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 272 p.

15. Свириденко А. И., Чижик С. А., Петроковец М. И. *Mekhanika diskretnogo friksionnogo kontakta* [Mechanics of discrete frictional contact]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1990, 272 p.

Myshkin N. K., Belyi A. V., Kholodilov O. V. *Trenie i iznos* [Friction and wear]. Gorn'ye, Gos. nauch. uch. Institut mekhaniki metallopolimernykh sistem im. V. A. Belogo, 1981, 686 p.

© Гришин А. А., Смирнов Н. А., Харитонов А. И., 2014